Untersuchungen
über Korrosionserscheinungen und Metallose
bei der Bündel-Nagelung

von

Johann Blüml

aus Seestetten

1963

1963 № 126

Aus der Chirurgischen Universitätsklinikn Erlangen

Direktor: Prof. Dr. med. G. Hegemann

UNTERSUCHUNGEN ÜBER KORROSIONSERSCHEINUNGEN UND METALLOSE BEI DER BÜNDEL-NAGELUNG

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Medizinischen Fakultät

der

Friedrich-Alexander-Universität

zu

Erlangen

vorgelegt von

Johann Blüml

aus Seestetten

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Dekan: Prof. Dr. G. Theissing
Referent: Prof. Dr. K. H. Hackethal
Korreferent: Prof. Dr. G. Hegemann

Tag der mündlichen Prüfung: 13.9.1963

Meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr. K.H. Hackethal, möchte ich an dieser Stelle für die Überlassung des Themas und für die wertvollen Anregungen bei der Durchführung meiner Untersuchungen meinen aufrichtigen Dank aussprechen.

Mein Dank gilt auch Herrn Professor Dr. Weinig, Institut für Gerichtliche Medizin Erlangen, der die Analyse der bräunlichen Auflagerungen in der Umgebung der Korrosionsstellen vornahm und Herrn Professor Dr. Pfeilsticker, Chemische Untersuchungsanstalt Stuttgart, der einige Gewebstücke spektralynalytisch untersuchte.

Meinem lieben Onkel

Franz Weilhart

in Dankbarkeit gewidmet

Inhalt

I. Korrosionserscheinungen bei Bündel-Nagelungen.....2

A. Begriffsbestimmung.....2

B. Durchführung der Untersuchungen.....2

C. Untersuchungsergebnisse.....3

1. Messung der Korrosionsstärke.....3

2. Ausdehnung der Korrosionsstellen.....6

3. Aussehen der Korrosionsstellen.....7

4. Lokalisation der Korrosionsstellen.....8

5. Bräunliche Auflagerungen in der Umgebung der Korrosionsstellen.....9

6. Korrosionstärke und Verweildauer.....9

7. Korrosion und Nagelungstyp.....1o

8. Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse.....1o

D. Korrosionsschäden der Bündelnägel im Vergleich zu Korrosionsschäden anderer Marknägel.....1o

E. Ursachen der Korrosion.....12

1. Endogene Faktoren.....12

a. Verschiedenheit der Metalle.....12

b. Materialfehler.....12

c. Magnetische Einflüsse.....14

2. Exogene Faktoren 15

a) Mechanische Veränderungen der Nageloberfläche durch Instrumente 16

aa) Metallübertragung 16

bb) Beschädigung der Oberfläche durch Instrumente 17

b) Faktoren, die postoperativ auf die Nägel einwirken 19

aa) Unterschiedliche Sauerstoffversorgung 19

bb) Mechanische Beanspruchung durch Biegung 20

cc) Mechanische Beanspruchung durch Druck und Reibung 22

dd) Wechselbeanspruchung durch die Körperbewegung 29

ee) Wechselwirkung 32

3. Zusammenfassung der Korrosionsursachen 32

F. Allgemeine Vorbeugungsrichtlinien 33

G. Suche nach besseren Stählen 33

II. Metallose 36

A. Begriffsbestimmung 36

B. Metalloseschäden nach Bündel-Nagelungen 36

C. Metallimprägnation des Nagellagers 36

1. Untersuchung des Gewebes 36

a) Histologisch 36

aa) Untersuchung des Gewebes auf entzündliche Reaktion 37

bb) Untersuchung des Gewebes auf Eisenionen.....37

b) Spektralanalytisch 41

2. Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse 42

3. Metallimprägnation bei anderen Nagelungen 42

4. Ursachen der Metallimprägnation 43

a) Korrosionsprodukte 43

b) Zurückbleiben von Metallteilchen 44

5. Klinische Auswirkungen der Metallimprägnation 46

IV. Zusammenfassung 47

Literatur 51

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41536505_0017

Mir war zur Aufgabe gestellt, Untersuchungen über Korrosionserscheinungen und Metallose bei der Bündel-Nagelung durchzuführen.

I. Bei der Untersuchung der Korrosionserscheinungen sollten folgende Fragen beantwortet werden:

1. Wie stark ist die Korrosion der Bündelnägel?
2. Welche Fläche nehmen die Korrosionsstellen ein?
3. Zeigen die Korrosionsstellen irgendwelche Charakteristika des Aussehens und der Lokalisation?
4. Was bedeuten die bräunlichen Auflagerungen in der Umgebung der Korrosionsstellen?
5. Bestehen Zusammenhänge zwischen Verweildauer, Nagelungstyp und Korrosionsstärke?
6. Bestehen auffallende Unterschiede zwischen den Korrosionsschäden der Bündelnägel und anderer Marknägel?
7. Ursachen der Korrosion?
8. Gibt es außer dem V2A-Stahl noch besseres Allenthesenmaterial?

II. Die Untersuchungen über Metallose bei Bündel-Nagelungen erstreckten sich nur auf die metallimprägnation des Nagellagers. Hier waren folgende Fragen zu beantworten:

1. Ist in der Umgebung des Nagellagers Eisen nachzuweisen?
2. Zeigt das Gewebe in der Umgebung des Nagellagers entzündliche Reaktion?
3. Wandert bei der Korrosion der Nägel nur die Eisenkomponente in das Gewebe ab, oder wandern auch die anderen Bestandteile des Stahls in das umliegende Gewebe ab?
4. Wie steht es mit Metallimprägnationen bei anderen Nagelungen?
5. Ist die Metallimprägnation auf Korrosion oder auf das Zurückbleiben von Metallteilchen beim Abschneiden der Nägel zurückzuführen?
6. Waren klinische Auswirkungen der Metallimprägnation zu beobachten?

I. Korrosionserscheinungen bei Bündel-Nagelungen

A. Begriffsbestimmung

Unter Korrosion versteht man ganz allgemein eine Zersetzung eines Metalls bzw. einer Metallegierung durch einen elektrochem. Vorgang, der durch verschiedene Ursachen ausgelöst werden kann. Die Metallzersetzung kann sich in leichteren Fällen nur auf die Oberfläche beschränken, kann aber in schwereren Fällen in die Tiefe fortschreiten und in den schwersten Fällen sogar zur völligen Auflösung des Metalls oder der Legierung führen. Kommt es zur lochförmigen Auflösung des Metalls, so bezeichnet man diese Erscheinung als Lochfraß.

B. Durchführung der Untersuchungen

Um ein genaues Bild von dem Ausmaß der Korrosionserscheinungen der Bündelnägel zu bekommen, wurden die Bündelnägel, die in dem Zeitraum von Februar 1961 bis Januar 1962 entfernt wurden, auf Korrosionsserscheinungen untersucht. Insgesamt waren es 46 Bündel (=329 Nägel), die einer genaueren Untersuchung unterworfen wurden.

Bei der Durchsicht der Nägel konnte man ohne weiteres schwere Korrosionsschäden von leichteren bzw. minimalen Schäden unterscheiden. Da uns aber eine genauere Abstufung interessierte, wurden Tiefe und Ausdehnung der Korrosionsstellen bestimmt.

Die Tiefenmessungen der Korrosionsstellen erfolgten mit einer Schiebelehre von 1/20 mm Genauigkeit, wobei eine feine Stahlnadel, die an einem Arm der Schiebelehre angelötet war, am tiefsten Punkt der Korrosionsstelle angesetzt wurde (Abb.1). Befanden sich an einem Nagel gleichzeitig mehrere Korrosionsstellen verschiedener Stärke, so wurde nur jeweils die stärkste berücksichtigt.

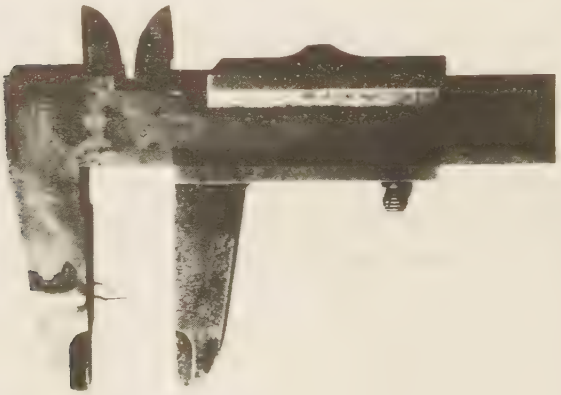

Abb. 1.

Schiebelehre mit einer an einem Arm angelöteten Stahlnadel.

Zur Flächenbestimmung der Korrosionsstellen diente ein einfaches Verfahren. Die Umrisse der Korrosionsstellen wurden auf ein mm-Papier übertragen und dann damit annähernd die Fläche bestimmt. Diese Messungen waren nicht vollständig exakt, erfüllten aber den Zweck insofern, als es uns nur darum ging, mittlere Werte von der Ausdehnung der Korrosionsstellen zu bekommen.

Weiterhin wurden bei den Untersuchungen auf Lokalisation und Aussehen der Korrosionsstellen, sowie auf sonstige Veränderungen der Nägel und auf eine bestehende Abhängigkeit der Korrosion vom Nagelungstyp geachtet.

C. Untersuchungsergebnisse

1. Messung der Korrosionsstärke

Die Messungen der Korrosionsstellen mit der Schiebelehre ergaben nun, daß die Korrosionsstellen im Durchschnitt eine Tiefe von 1/10, 2/10 oder 3/10 mm erreichten. In vielen Fällen waren jedoch die Korrosionserscheinungen so minimal, daß sie zwar für das bloße Auge noch gut erkennbar waren, aber nicht mehr gemessen werden konnten (Abb. 2). Es handelte sich also praktisch fast immer um oberflächliche Korrosion. Nur viermal wurden in unserem Beobachtungsgut Stellen beobachtet, die stärker als 3/10 mm waren (zweimal 4/10, je einmal 5/10 und 8/10 mm). Die Maximaltiefe von 8/10 mm wies ein Nagel mit einer Verweildauer von 21 Monaten auf (Abb. 3).

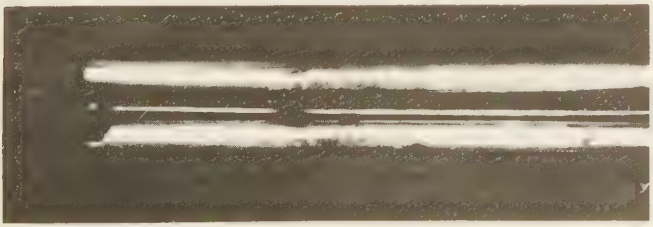

Abb. 2. Minimale Korrosion an zwei benachbarten Nägeln, etwa 1 cm vom Nagelende entfernt.

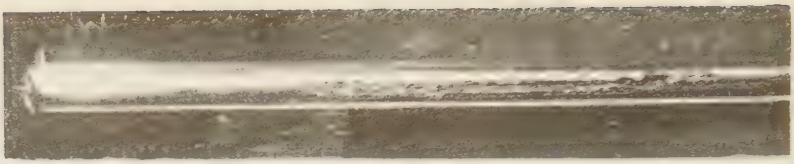

Abb. 3. Der am stärksten beschädigte Bündelnagel (Unterschenkelnagelung bei einem 25jährigem Patienten). Die Korrosionsstelle ist an der konkaven Seite eines stark geschlängelten Nagels, ungefähr 3 cm vom Nagelende entfernt, lokalisiert. Durch Lochfraß erreicht die Korrosionsstelle eine maximale Tiefe von 8/10 mm.

An Hand zweier Querschnittsbilder durch korrodierte Nägel lassen sich die Tiefen der Korrosionsstellen gut erkennen.

a -

b

Abb. 4. Querschnitt durch einen Bündelnagel, der an zwei Seiten verschieden starke Korrosionsstellen aufweist.

a) ca 2/10 mm. b) nicht mehr meßbar.

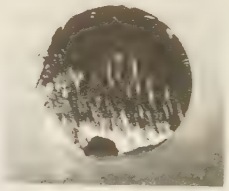

Abb. 5. Der Nagelquerschnitt zeigt, daß hier die Korrosion an der tiefsten Stelle durch Lochfraß ca. 4/10 mm erreichte. Daneben nur 1/10 mm. Nagelentfernung nach 5 1/2 Monaten.

(Die unter schiedlichen Zeichnungen der Metallstrukturen in

beiden Querschnittsbildern beruhen darauf, daß die groben Unebenheiten, die durch das Abschneiden mit der Metallsäge entstanden sind, jedesmal auf eine andere Art beseitigt wurden).

Das Ergebnis der Tiefenmessungen ist in Tab. 1 zusammengefaßt. Der Korrosionsstärke wurde gleichzeitig die entsprechende Verweildauer der Nägel gegenübergestellt.

Verweildauer	Zahl d. Bündel	Zahl d. Nägel	Korrosionserscheinungen keine	nicht meßbar, aber erkennb.	meßbar bei folgenden Tiefen in mm (aufgerundet) 1/10	2/10	3/10	über 3/10
2	1	5	2	3	-	-	-	-
3	7	50	14	21	15	-	-	-
3,5	2	17	3	7	7	-	-	-
4	6	37	10	15	10	2	-	-
4,5	1	11	2	6	3	-	-	-
5	6	47	9	14	18	3	3	-
5,5	4	39	3	5	21	7	2	1
6	6	42	9	9	16	4	4	-
7	3	15	1	7	5	2	-	-
8	5	28	1	5	13	7	2	-
9	1	8	-	1	4	3	-	-
10	1	6	-	1	3	2	-	-
11,5	1	11	1	4	4	2	-	-
15,5	1	7	-	-	2	1	4	-
21	1	6	-	-	-	1	2	3
	46	329	55	98	121	34	17	4
		100%	16,7%	29,9%	36,7%	10,4%	5,1%	1,2%

Tab.2. Korrosionsstärke und Verweildauer von 329 Bündelnägeln.

2.Ausdehnung der Korrosionsstellen

Die Ausdehnung der schadhaften Stellen betrug in den leichtesten Fällen nur einige qmm. Am häufigsten schwankte die Ausdehnung zwischen 10 und 50 qmm, während im Höchstfall die Korrosionsstellen eine Fläche von ca. 100 qmm erreichten. Die Korrosion betraf dabei die Nägel nicht im ganzen Umfang, sondern war immer nur auf eine Seite beschränkt, auch dann, wenn zB. ein Nagel an zwei verschiedenen Seiten korrodiert war.

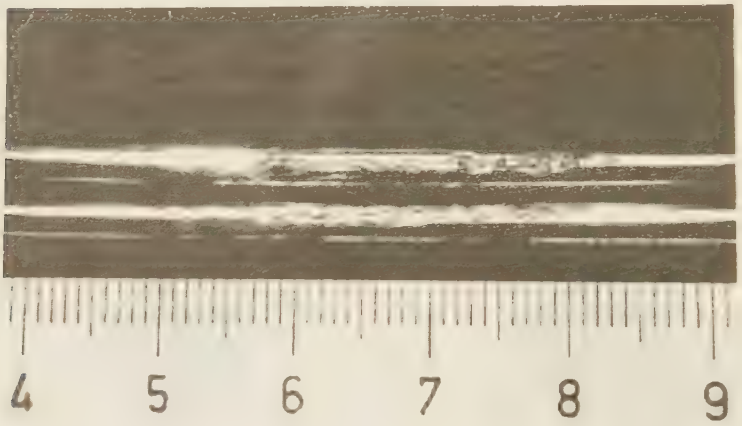

Abb. 6. Zwei Nägel mit Korrosionsherden an den Kontaktstellen. Tiefe bis zu 3/10 mm. Fläche ungefähr 70 qmm, bei einer Länge von 3,5 cm und einer Breite von ca.2mm.

Auffallend ist das gleiche Aussehen der Korrosionsstellen, die sich hier schräg über den Nagel hinziehen. Lokalisation : 10 cm von der Nagelspitze entfernt!

Abb.7 . Typische oberflächliche Korrosion mit einer Fläche von etwa 50 qmm. Die Korrosionsstellen, die sich im mittleren Nagelabschnitt, an den Berührungsstellen, befinden, sind wiederum gleich stark und haben die gleiche Ausdehnung.

3. Aussehen der Korrosionsstellen

Bei der Besichtigung der Korrosionsstellen ist der längliche, meist streifenförmige Verlauf auffallend, der sich durchwegs bei allen korrodierten Nägeln verfolgen läßt. Überprüft man die einzelnen Korrosionsstellen eines Nagelbündels, so kommt man zu der Feststellung, daß sich diese Stellen stets zwischen zwei nebeneinanderliegenden Nägeln befinden und sich hinsichtlich Ausdehnung und Stärke, bis auf wenige Ausnahmen, mit konstanter Regelmäßigkeit entsprechen. Es ist eine Leichtigkeit, mit Hilfe der zusammenpassenden Korrosionsstellen die Kontaktstellen und damit die Lage der einzelnen Nägel in situ zu rekonstruieren. Manchmal sind einige Nägel schlangenartig gewunden und weisen nicht selten an den Stellen der Krümmungen, dort wo sich zwei Nägel überkreuzen, schräg über den Nagel verlaufende Korrosionsstellen auf. Während die meisten Korrosionsstellen ziemlich gleichmäßig stark korrodiert sind, weisen manche Korrosionsherde kleinere Löcher als Ausdruck eines sog. Lochfraßes auf (Abb. 8).

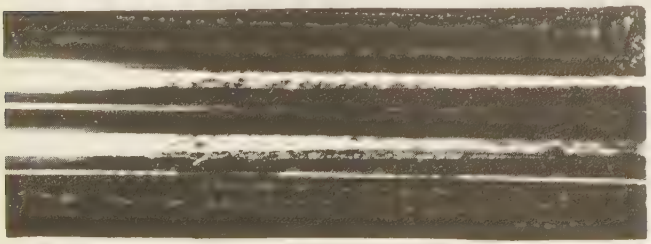

Abb. 8.

Abb. 8. Strichförmig verlaufende Korrosion an den Berührungsstellen beider Nägel. Die kleinen Löcher (bis zu 3/10mm) sind als Ausdruck des sog. Lochfraßes zu werten.

4. Lokalisation der Korrosionsstellen.

Bezüglich der Lokalisation der einzelnen Korrosionsstellen ist zu sagen, daß Korrosion an allen Nagelabschnitten beobachtet wurde, wenn auch mit überwiegender Häufigkeit in den ersten vier Segmenten. Frei von Korrosionsschäden waren überraschenderweise die Schnittstellen. Sie waren in keinem einzigem Fall durch Korrosion angegriffen, auch dann nicht, wenn sich die Korrosionsstellen bis an die Schnittstellen hinzogen.

Abb. 9. Ein Bündel abgeschnittener Nägel.
Die Schnittstellen weisen nach der Nagelentfernung keinerlei Zeichen einer Metallzersetzung auf.

5. Bräunliche Auflagerungen in der Umgebung der Korrosionsstellen.

In der Umgebung der Korrosionsstellen sind häufig bräunlich-rote Auflagerungen zu sehen, die oft einzelne Nägel circulär einhüllen. Diese Auflagerungen lassen sich nicht abwischen, sondern nur mit einem hartem Gegenstand wegschaben. Worum handelt es sich hier? Sind es Rost- oder Blutauflagerungen? Um diese Frage zu klären, wurden zwei Nägel mit derartigen Auflagerungen vom Institut fur"Gerichtliche Medizin" in Erlangen untersucht. Die Analyse ergab, daß sich nur an einem Nagel eine kleine Blutspur mit der Benzidinprobe nachsen ließ, während die übrigen braunen Stellen, die an sich auch blutähnlich aussahen, mit Benzidin negativ reagierten, aber mit der Berliner-Blau-Reaktion eindeutig eine positive Eisenreaktion ergaben. Lupenmikroskopisch war keine Korrosion de. Oberfläche festzustellen. Es handelt sich demnach bei diesen bräu.lichen Stellen um Auflagerungen von Rost,der beim Korros orsvergang entsteht und der zum Teil mit Blutspuren vermischt sein kann.

6. Korrosionsstärke und Verweildauer

In Tab. 1 sind Korrosionstiefe und Verweildauer der einzelnen Nägel gegenübergestellt. Aus dieser Gegenüberstellung geht hervor, daß von dem Bündel, das nur 2 Monate gelegen hat, bereits 3 Nägel ganz minimale Korrosionserscheinungen aufwiesen. (Es handelte sich um eine Oberschenkelnagelung bei einem 10-jährigen Jungen). Von den Nägeln mit einer Verweildauer bis zu 5 Monaten zeigten alle Nägel, bis auf zwei Ausnahmen, nur Korrosionsstellen von höchstens 1/10 mm Tiefe. Nach 5 Monaten waren häufiger Korrosionsschäden mit einer Tiefe von 2/10 und 3/10 mm zu verzeichnen.Abweichungen zeigen allerdings die Nägel mit einer Verweildauer von 7, 9, 10 und 11 1/2 Monaten, die wider Erwarten weniger stark korrodiert waren, als zB. andere Nägel mit einer kürzeren Verweildauer. Die stärksten Schäden fallen auf die Nägel, die 15 1/2

und 21 Monate gelegen haben. Einen ähnlich starken Schaden wies aber auch ein Nagel auf, der bereits nach 5 1/2 Monaten entfernt wurde.

Es ist daher schwer, Korrosionsstärke und Verweildauer der einzelnen Nägel auf einen einheitlichen Nenner zu bringen. Über die Faktoren, die für die Korrosionsstärke verantwortlich zu machen sind, wird auf Seite 31 berichtet.

7. Korrosion und Nagelungstyp

Eine Abhängigkeit der Korrosion von der Art der Fraktur konnte nicht beobachtet werden. Korrosion tritt bei Oberarmnagelungen etwa ebenso häufig auf, wie bei Unterschenkel- und Oberschenkelnagelungen.

8. Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchungen der 329 Bündelnägel ergaben, daß nur 17% frei von Korrosionserscheinungen waren, während an rund 83% Schäden irgendwelcher Art vorhanden waren. In den meisten Fällen (ca. 67%) handelte es sich um oberflächliche Korrosion. Lediglich in einem relativ geringen Prozentsatz (ca. 16%) waren stärkere Korrosionsschäden zu verzeichnen.

Die Ausdehnung der Korrosionsstellen betrug im Durchschnitt 10 - 50 qmm, erreichte in den leichtesten Fällen nur einige qmm, im Höchstfall dagegen ca. 100 qmm.

Die Korrosionsstellen sind dadurch charakterisiert, daß sie stets an den K o n t a k t s t e l l e n b e n a c h b a r t e r N ä g e l a u f t r e t e n .

Korrosion wurde an allen Nagelabschnitten beobachtet. Niemals dagegen an den Schnittstellen.

Bräunliche Auflagerungen in der Umgebung der Korrosionsstellen sind durch Rost und Blutspuren bedingt.

Eine Gegenüberstellung von Korrosionsstärke und Verweildauer ergab, daß keine strenge Beziehung zwischen Korrosionsstärke und Verweildauer besteht.

Eine Abhängigkeit der Korrosion vom Nagelungstyp besteht nicht.

D. Korrosionsschäden der Bündelnägel im Vergleich zu Korrosionsschäden anderer Marknägel

Zahlenmäßige Angaben über Korrosionsschäden bei anderen Nagelungsarten liegen in der Literatur wenig vor. KRÖSL berichtet über Rostschäden bei 35,4% aller entfernten "rostfreien" Marknägel bei einer durchschnittlichen Verweildauer im Markraum von 34,2 Wochen. Die Korrosionsuntersuchungen der Bündelnägel ergaben, daß bei einer mittleren Verweildauer von 7 3/4 Monaten nur 55 Nägel völlig unversehrt geblieben sind, während rund 83% aller Nägel Korrosionserscheinungen aufweisen.

Vergleicht man die Beobachtungen KRÖSL'S mit den Beobachtungen, die bei Bündelnägeln gemacht wurden, so ist die Häufigkeit korrodierter Bündelnägel auf den ersten Blick erschreckend.

Bei der Beurteilung unserer Untersuchungsergebnisse muß man aber berücksichtigen, daß jede kleinste Korrosionsstelle mitgerechnet wurde und daß sich die Stärke der Schädigungen stets im Rahmen des Tragbaren hielt.

Allgemein darf man daher feststellen, daß auf Grund dieser Beobachtungen wesentliche Unterschiede in der Korrosionsanfälligkeit zwischen Bündelnägeln und anderen Marknägeln nicht bestehen.

Korrosion ist also eine viel häufigere Erscheinung, als nach metallurgischen Qualitäten der Nägel, die aus "korrosionsfestem" und "rostfreiem" Stahl hergestellt werden, zu erwarten wäre. "Korrosionsfest" und "rostfrei" sind allerdings industrielle Begriffe für Stähle von besonderer Widerstandsfähigkeit gegenüber bestimmten Einflüssen. Man kann deshalb diese Begriffe für die Verhältnisse im Körper, in dem unter Abschluß der Außenluft besondere Bedingungen für das Metall herrschen, nicht in gleicher Weise anwenden. Nach FERGUSON darf man von der Korrosionsbeständigkeit eines Metalls in einem bestimmten Medium nicht gleich auf dieselbe Korrosionsbeständigkeit in einer anderen Umgebung schließen.

E. Ursachen der Korrosion

Nach R.NICOLE ist das Vorhandensein elektr. Ströme, also das Vorhandensein eines Volta-Elements, Voraussetzung für das Entstehen der Korrosion.

Welches sind die wichtigsten Faktoren, die für das Entstehen eines Volta-Elements und damit für den Beginn des Korrosionsvorgangs verantwortlich zu machen sind? Welche Rolle spielen sie bei Bündel-Nagelung?

1. Endogene Faktoren

Zu dieser Gruppe gehören Faktoren, die nicht durch äußere Beeinflußung, sondern nur durch einen rein metallurgischen Vorgang zur Korrosion führen.

a) Verschiedenheit der Metalle

Besteht eine Allenthese aus verschiedenen Metallen, so ist die Entstehung eines Volta-Elements in einer elektrolytischen Lösung, wie sie der Gewebssaft darstellt, ohne weiteres verständlich. Dabei ist hier stets das unedlere Metall die Anode, d.h. hier gehen Ionen in Lösung und hier beginnt der Zersetzungsprozeß. Setzt sich aber eine Allenthese aus mehreren Bestamdteilen zusammen, die alle einwandfrei die gleiche chemische und strukturelle Zusammensetzung aufweisen, so ist die Korrosion nicht so einfach zu erklären.

b) Materialfehler

Treten an einer Allenthese Korrosionsschäden auf, so denkt man zuerst an Materialfehler. Solche Materialfehler können durch Innomogenitäten der Oberfläche, durch nicht-metallische Einschlüsse oder durch unterschiedliche Härte einzelner Nagelabschnitte bedingt sein. Dadurch entstehen Zonen verschiedenen Lösungsdruckes, die bei Gegenwart eines Leiters II.Klasse (Gewebssaft) zur Bildung von Lokalelementen führen.

Schon Differenzen der Korngröße, die dadurch entstehen, daß während der Herstellung an den Korngrenzen durch "Carburisation" - durch Kohlenstoffresorption - zur Bildung von Chromkarbiden kommt, können einen solchen Effekt haben und zur "interkristallinen Korrosion" führen.

Materialfehler können verschiedene Folgen haben. Es kann entweder zum Bruch, zur Verbiegung oder zur Korrosion der Allenthese kommen. R.NICOLE machte die Beobachtung, daß unerklärlich, spontan auftretende Korrosionserscheinungen meistens einem Materialfehler zuzuschreiben sind.

Die Korrosionserscheinungen, die an Bündelnägeln beobachtet wurden, unterliegen bestimmten Gesetzmäßigkeiten, insofern, als sie nur an Kontaktstellen nebeneinanderliegender Nägel auftreten. Dafür, daß die Häufigkeit der Korrosion auf Materialfehler zurückzuführen wären, ließen sich keine Anhaltspunkte finden.

Während R.NICOLE die primäre Ursache der Korrosion durch Materialfehler für gering hält, hatte M.LANGE auf Grund klinischer Beobachtungen wiederholt Zweifel, ob das Osteosynthesenmaterial auch wirklich den Deklarierungen entsprach. Er ließ deshalb entsprechende Untersuchungen durchführen. Das Ergebnis dieser Untersuchungen war: " 50 Metallstücke, die in den vergangenen Monaten bei Patienten, die in den verschiedenen Gegenden operiert waren, entfernt werden mußten, hatten noch nicht zu 10% einwandfreie V_2A-Stahl-Zusammensetzung."

Die Bündelnägel sind alle hinsichtlich ihres strukturellen und chemischen Aufbaus völlig gleich (wie der Hersteller jedenfalls garantiert). Seitdem Bündelnagelungen durchgeführt werden, wurden nur zweimal Schäden beobachtet, die auf einen Materialfehler hindeuteten. In dem einen Fall handelte es sich um einen Nagel, der bei der Enfernung abgebrochen war, im anderen Fall war es ein Nagel, der einen etwa 1cm langen von der Schnittstelle ausgehenden Spalt zeigte,

der sich deutlich von den üblichen Korrosionsschäden unterschied. Diese Beobachtungen stellen aber Ausnahmeerscheinungen dar.

Materialfehler spielen also bei Bündel-Nagelungen nur eine untergeordnete Rolle. Aber ganz werden sich diese auch bei den modernen hochwertigen Edelstählen kaum vermeiden lassen (LETTENBAUER).

c) Magnetische Einflüsse

Von einem korrosionsfesten Stahl fordert man, daß er in einem austenitischen, d.h. nicht-magnetischen Zustand vorliegt. Diese Eigenschaft ist an ein bestimmtes Kristallgitter gebunden. Durch nachträgliche Verformung kann nun dieses austenitische in ein martensitisches, d.h. magnetisches Kristallgitter umgewandelt werden, wodurch lokal Potentialunterschiede gegenüber den unveränderten Stellen hervorgerufen werden und das Metall dadurch korrosionsanfälliger wird. Die Bündelnägel sind alle leicht magnetisch. Da bei der Bündel-Nagelung höhere Festigkeitsansprüche gestellt werden müssen, mußte deshalb bei der Herstellung eine geringgradige Magnetisierbarkeit in Kauf genommen werden. Damit konnte zwangsläufig das Optimum der Korrosionsbeständigkeit nicht erreicht werden.

M.LANGE mißt den magnetischen Einflüssen eine große Bedeutung bei: " Magnetische Einflüsse begünstigen die Metallose, fördern die Korrosion und intensivieren die Gewebsschädigung. Nur der austenitische Stahl ist korrosionsfest, und nur er ist für die Osteosynthese geeignet."

Zur gleichen Feststellung kommt J.COHEN, der ebenfalls schreibt, daß die austenitischen Stähle am korrosionsbeständigsten sind.

Es ist selbstverständlich, daß Allenthesen, die sich ganz oder teilweise als stark magnetisch erweisen, keinesfalls

zu verwenden sind. Haben aber geringe magnetische Eigenschaften die gleichen schädlichen Wirkungen? W.SCHINK ist der Ansicht, daß diejenigen Werkstücke, die nur leicht magnetisch sind, nicht unbedingt für Osteosynthesen ausgeschieden werden müssen.

Ob eine Begünstigung der Korrosion der Bündelnägel durch ihre leicht magnetischen Eigenschaften in der Tat vorhanden ist, konnte in diesem Zusammenhang nicht nachgewiesen werden. Die Frage, in wieweit der Magnetismus die Korrosionsbeständigkeit der Bündelnägel beeinflußt, muß offen bleiben.

Da diese endogenen Faktoren keine zufriedenstellende Erklärung für das Entstehen der Korrosion geben, müssen demnach noch andere Faktoren in Frage kommen.

2. Exogene Faktoren

Durch äußere Einflüsse kann das Metall bzw. die Legierung in einen veränderten Zustand versetzt werden, der die Widerstandsfähigkeit gegenüber dem Korrosionsangriff herabsetzt. Das Ursächliche wäre also eine Zustandsänderung der Allenthese. Erst sekundär käme es zwischen den veränderten Stellen durch Elementbildung zur elektochemischen Korrosion.

Welche äußeren Einflüsse können an den Bündelnägeln zu Veränderungen führen, die dann den Korrosionsprozeß in Gang bringen?

Diese in Frage kommenden exogenen Faktoren kann man unterteilen in Faktoren, die schon während der Operation durch Benützung der Instrumente zu einer Veränderung der Nägel führen und in Faktoren, die erst postoperativ bis zur Nagelentfernung auf die Nägel einwirken.

a) Mechanische Veränderungen der Nageloberfläche durch Instrumente

aa) Metallübertragung

Ein Faktor, dem in letzter Zeit in der Literatur als Korrosionsursache viel Beachtung geschenkt wird, ist die "Metallic Transfer", worunter man das Zurückbleiben kleinster Metallteilchen an Schrauben und Nägeln versteht. M.LANGE schreibt dazu: "Kleine Metallteilchen bleiben vom Schraubenziehen an der Schraube haften und das Volta'sche Element ist fertig, sobald die Wunde geschlossen ist, und die elektrolytische Wirkung kann von der kleinen Korrosionsstelle aus beginnen."

Diese Behauptung wird von P.G.LAING durch dessen Untersuchungen über Korrosion an Schrauben unterstützt. Durch radioaktive Isotopen konnte nämlich nachgewiesen werden, daß jedesmal, wenn ein Metall mit einem anderen in Berührung kommt, kleinste Metallteilchen zurückbleiben. Es entstehen auf diese Art und Weise "viele kleine Batterien", die dann die Korrosion des implantierten Metalls bewirken.

Diese Metallübertragung ist zweifellos vorhanden, auch nach Bündel-Nagelungen. Aber ob sie diese verhängnisvolle Rolle spielt, die ihr zugesprochen wird, ist sehr in Zweifel zu ziehen. Prüft man die Bündelnägel auf Korrosionserscheinungen als Folge zurückgebliebener Teilchen, so kommt man durch verschiedene Beobachtungen zu der Überzeugung, daß die Korrosion an den Bündelnägeln durch zurückgebliebene Metallpartikelchen nicht bedingt sein kann.

Die erste Beobachtung ist die, daß die abgeschnittenen Nagelenden nie korrodiert waren. Wenn auch nach dem Abschneiden der Nägel die Wunde noch sorgfältig mit einem feuchten Tupfer ausgewischt wird, so bleiben wahrscheinlich immer noch einige Metallteilchen an den Schnittflächen haften, die

dann zur Volta-Element-Bildung führen können. Selbst früher, als die Wunden noch nicht ausgewischt wurden, waren die Schnittstellen nie korrodiert. An diesen Schnittstellen wären also die besten Voraussetzungen gegeben, die korrosionsbegünstigende Wirkung zurückgebliebener Metallteilchen zu bestätigen.

Als Zweites wurde die Beobachtung gemacht, daß es bei Benützung des Einführungsinstrumentes an den multiplen Klemmstellen, an denen ebenfalls immer Metallteilchen zurückbleiben, nicht verstärkt zur Korrosion kommt. Das relativ häufige Auftreten der Korrosion in diesem Bereich hat andere Ursachen.

Schließlich sei noch auf die Beobachtung hingewiesen, daß es an den Stellen, an denen der Schränkelevator angesetzt wird, in keinem Fall zur Korrosion als Folge zurückgebliebener Metallteilchen kam.

bb) Beschädigung der Oberfläche durch Instrumente

Eine noch größere Rolle als die Metallübertragung spielt die mechanische Beschädigung der Nageloberfläche durch Instrumente.

Es ist eine allgemeine Erkenntnis, daß die Korrosionsbeständigkeit eines Metalls von der Unversehrtheit seiner oberflächlichen Oxydschicht mit abhängig ist.

FERGUSON schreibt, daß die Wahrscheinlichjeit für die Enstehung von Potentialdifferenzen umso geringer ist, je einheitlicher die Oberfläche beschaffen ist. Jeder Kratzer und jede Aufrauhung kann zum Ausgangspunkt der Korrosion werden.

Bei Bündel-Nagelungen läßt sich das Gebot, die Nägel mit unversehrter Oberfläche zu versenken, nicht einhalten. An einigen Stellen kommt es unvermeidbar zur Verletzung der oberflächlichen, aus Chromoxyd bestehenden Schutzschicht durch Werkzeuge. Und zwar sind dies gleichzeitig diejenigen Stellen, an denen es bereits durch das Zurückbleiben von Metallteilchen zur Elementbildung kommen kann. Diese Stellen sind : Die abgeschnittenen Nagelenden, die Klemmpunkt des

Einführungsinstrumentes und die Ansatzstellen des Schränkelevators.

Die Befürchtungen, daß die Beseitigung der Oxydschicht durch die Instrumente bevorzugt zur Korrosion führt, vorausgesetzt, daß keine anderen Kräfte zur Geltung kommen, haben sich nicht bestätigt.

Die Oxydschicht fehlt an den Schnittstellen ganz. Daß sie aber niemals Korrosionserscheinungen aufweisen, ist bereits als Beweis dafür anzusehen, daß es durch instrumentelle Oberflächenschädigung allein nicht zur Korrosion kommt. Eine Unterstützung findet diese Behauptung noch durch die Beobachtungen, daß

1. Korrosion auch an den Nagelabschnitten auftritt, an denen die Nägel mit keinem Instrument in Berührung kommen, also bei der Nagelung keine Oberflächenschädigung erleiden,

2. das erste Einführungsinstrument, im Gegensatz zu dem jetzt verwendeten, größere Kratzeffekte verursachte, eine Verringerung der Korrosion im Bereich der Klemmstellen aber nicht zu verzeichnen war,

3. an den Ansatzstellen des Schränkelevators, der die Oberfläche in ähnlicher Weise schädigt wie das Einführungsinstrument, Korrosion als Folge des Oberflächenschadens nie zu sehen war, obwohl durchschnittlich 3 bis 4 Nägel pro Bündel vorgeschränkt werden.

Daß die instrumentelle Beschädigung der Nageloberfläche allein nicht zur Korrosion führen muß, wird noch durch die Beobachtung von SCALES und WINTER unterstrichen, die erstmals die überragende Bedeutung der instrumentellen Oberflächenschädigung anzweifelten. Sie berichten über ihre Korrosionsuntersuchungen:" Many of the implants showed evidence of damage from rough usage with instruments, yet there were only three

cases of corrosion associated with these marks." Sie beobachteten, daß der Oberflächenzustand in vielen Fällen unzureichend war, daß dieser Umstand aber offensichtlich zu keiner Herabsetzung der Korrosionsbeständigkeit führte.
Das Ergebnis dieser Untersuchungen fassen sie in diese Worte: " It is evident that for the conditions with which we here are concerned this aspect is less critical than has been thought." Trotz dieser Erkenntnis halten sie aber die Forderung aufrecht, daß unnötige Schäden auf alle Fälle vermieden werden müssen, da es eine feststehende Tatsache ist, daß das Risiko der Korrosion umso geringer ist, je besser die Oberflächenbehandlung ist.

b) Faktoren, die postoperativ auf die Nägel einwirken

aa) Unterschiedliche Sauerstoffversorgung

Zwischen den Abschnitten einer Allenthese, die einer unterschiedlichen Sauerstoffversorgung, einer "Differential Aeration" (LAING) ausgesetzt sind, kann es zur Bildung einer "Sauerstoffzelle" kommen. Diese "Sauerstoffzelle" entsteht dadurch, daß Stellen, die der höheren Sauerstoffkonzentration ausgesetzt sind, zur Kathode werden, während die anderen zur Anode werden. An der Anode setzt dann die Auflösung des Metalls ein (COHEN).

Da die Oxydschicht in einem dynamischen Gleichgewichtszustand mit dem Sauerstoff der Umgebung steht, hängt die Beständigkeit des schützenden Oxydfilms vom vorhandenen Sauerstoff ab. Durch relativ anaerobe Bedingungen der Umgebung wird die Wahrscheinlichkeit der Korrosion gesteigert (COHEN). Die geringste Sauerstoffkonzentration herrscht dort, wo zwei Metalle aneinanderstoßen, wie dies zB. zwischen Platten und Schrauben der Fall ist (LAING).

Die Beobachtung, daß sich die Korrosionserscheinungen an den Bündelnägeln dadurch auszeichnen, daß sie stets zwischen zwei nebeneinander liegenden Nägeln auf-

treten, also dort, wo gleichzeitig die niedrigste Sauerstoffkonzentration vorliegt, spricht für die Bildung einer Sauerstoffzelle und einer dadurch bedingten Metallzersetzung.

Gegen den Einfluß der "Differential Aeration" spricht aber die Beobachtung, daß Korrosion nur an bestimmten Stellen auftritt, während die relativ anaeroben Bedingungen an allen Berührungsstellen der Nägel vorhanden sind.

In welchem Ausmaß diese Sauerstoffdifferenzen nun zur Korrosionsentstehung beitragen, kann nicht beurteilt werden.

bb) Mechanische Beanspruchung durch Biegung

Ist die Korrosion auf abnorme Biegungsbeanspruchung der Allenthese zurückzuführen, so wird diese Korrosionsart als S p a n n u n g s k o r r o s i o n bezeichnet. Die Spannungskorrosion ist Ausdruck einer Überdehnung der Allenthese in bestimmten Teilen. Nach R.NICOLE tritt die typische Spannungskorrosion fast stets im Bereich der maximalen Biegungsbeanspruchung auf. Als weiteres Beispiel einer Spannungskorrosion führt R.NICOLE die Totalüberdehnung einer Platte an, wie sie manchmal vorkommen, wenn man eine in ihren Formen nicht ganz passende Platte zurechtbiegt oder beim Einschlagen der Knochenfläche adaptiert. Die dadurch entstehenden Überdehnungen führen zu interkristallinen Verwerfungsflächen, besonders an den oberflächlichen Schichten. Damit besitzt der Fremdkörper einen Schwachpunkt. Es entstehen wiederum Zonen verschiedenen Lösungsdruckes, die den elektrolytischen Kräften des neuen galvanischen Elements oder den chemischen Einwirkungen der Umgebung wehrloser ausgeliefert sind, als die restliche polierte Oberfläche.

M.LANGE schreibt, daß Spannungskorrosion besonders dort auftritt, wo die Nägel gebogen werden. "Besonders ungünstig ist das Bearbeiten eines Metallnagels in einem Schraubstock mit einem Schrenkeisen. Die geschaffene Biegung bildet die Praedilektionsstelle für die Spannungskorrosion."

Die Spannungskorrosion ist also dadurch gekennzeichnet, daß sie an Orten starker Biegungsbeanspruchung auftritt. Wo liegen bei den Bündelnägeln solche Praedilektionsstellen für die Spannungskorrosion?

Als solche für die Spannungskorrosion besonders anfälligen Stellen wären zu nennen:

1.Die vorgeschränkten Abschnitte im Bereich der Nagelspitzen.

Hier wurde, wie bereits erwähnt, nur selten Korrosion beobachtet, und wenn, dann lagen die Korrosionsstellen immer an Berührungsstellen zweier Nägel. Das Vorschränken eines Nagels allein genügt alse nicht, um den Korrosionsvorgang auszulösen, wie durch eine Vielzahl vorgeschränkter Nägel, die im Bereich der Krümmung keinerlei Korrosionserscheinungen zeigten, bestätigt wurde.

2.Die Nagelkurve, d.h. der Nagelabschnitt zwischen Fenster und Auftreffeld.

In diesem Bereich wird zwar ebenso häufig, wie an anderen Nagelabschnitten, Korrosion beobachtet. Charakteristisch für eine Spannungskorrosion wäre, wenn die Korrosion hier entweder bedingt durch die Zugspannung an den konvexen Seiten oder bedingt durch Druckspannung an den konkaven Seiten auftreten würde. Die Beobachtung, daß im Bereich der Nagelkurve Korrosion nur dann auftritt, wenn zwei Nägel in engstem Kontakt stehen, spricht nicht dafür, daß die Korrosion der Bündelnägel nur auf abnorme Biegung zurückzuführen wäre.

3.Nach L.BÖHLER ist die Allenthese auch im Bereich der Fraktur der Gefahr der Spannungskorrosion ausgesetzt. Er machte die Beobachtung, daß die häufigste Korrosion immer mit dem Bruchspalt zusammenfällt, wo die Fraktur den stärksten Abscherungs- und Biegungsspannungen ausgesetzt ist. Diese Beobachtung BÖHLER`S, daß die Lokalisation der Korrosion in einer Beziehung zum Bruchspalt steht, fand bei unseren Korrosionsuntersuchungen keine Bestätigung.

cc) Mechanische Beanspruchung durch Druck und Reibung

Als letzte Korrosionsart kommt die K o n t a k t - k o r r o s i o n in Frage. Diese Kontaktkorrosion kann durch zwei mechanische Faktoren, die zwischen benachbarten Nägeln wirksam sein können, ausgelöst werden. Diese Faktoren sind: Druck und Reibung.

Den Entstehungsmodus der Kontaktkorrosion muß man sich folgendermaßen vorstellen: Durch die mechanischen Einflüsse, Druck und Reibung, werden die oberflächlichen Schutzfilme dauernden Veränderungen unterworfen, sodaß sie ihre Schutzwirkung nicht mehr ausüben können. Sind diese Einflüsse besonders stark, so kommt es nicht nur zu Abschabung der Oberfläche, sondern auch zu einem regelrechten Verschleiß der Nägel an den Kontaktstellen. Diese Stellen haben ihre Widerstandsfähigkeit gegen korrosive Einwirkungen der umgebenden Körpersäfte verloren, sodaß nunmehr an diesen lokal veränderten Nagelstellen durch Volta-Elementbildung elektrochemische Prozesse, Rostbildung und alle möglichen Abbauvorgänge, entsprechend den Bestandteilen der Legierung, einsetzen können.

Die primäre Ursache der Korrosion ist also eine ununterbrochene mechanische Beanspruchung der Nageloberfläche. Erst sekundär kommt es zur elektrochemischen Korrosion durch die Elementbildung. Die Korrosion der Bündelnägel ist also nichts rein Zufälliges, sondern lediglich Folge einer ungünstigen mechanischen Situation.

Wie bereits erwähnt, zeichnen sich die Korrosionsschäden an den Bündelnägeln dadurch aus, daß jeweils zwei Korrosionsstellen ähnlichen Verlauf und ähnliches Aussehen aufweisen. Auf Grund dieser übereinstimmenden Korrosionsstellen, die die Kontaktstellen der einzelnen Nägel wiederspiegeln, kann man Rückschlüsse auf die Lage der Nägel in situ ziehen. Diese Beobachtung ließ sich bei allen korrodierten Nägeln machen.

Analysiert man an allen Nägeln die Lokalisation der Korrosionsstellen, so kommt man zu der Feststellung, daß

die Korrosionslokalisation in Beziehung steht zur mechanischen Situation. Besonders ungünstigen mechanischen Verhältnissen sind die Abschnitte ausgesetzt, in denen die Nägel auf Grund der Nagelungsmethode durch die gewunschte Verklemmung maximal in Kontakt stehen. Aber auch dort, wo die Nagel eine vom Idealzustand abweichende, asymmetrische Anordnung einnehmen, herrschen an den Berührungsstellen ungünstige mechanische Bedingungen.

Zu einer multiplen Verklemmung der Nägel kommt es durch die Bündelschnürung. Diese erfolgt im Bereich des Corticalisfensters, im parataillaren konvergierenden Trichter, sowie im fensternahen Randstück und Mittelstück der Taille. An diesen Stellen der Querverklemmung stehen die Nägel am stärksten miteinander in Kontakt. Hier ist in erster Linie die Entstehung der Korrosion zu erwarten.

Die erste Bündelschnürung findet durch Querstücke des Fensterrahmens statt, durch die es zu einer intensiven Verklemmung des Nagelbündels kommt. Die Tatsache, daß Korrosion besonders oft an den im Corticalisfenster gelegenen Nagelabschnitten auftritt, zwingt zu der Annahme, daß bei manchen Nägeln, die intensiv verklemmt sind und daher extrem hoher mechanischer Beanspruchung ausgesetzt sind, es zu einer starken Veränderung der Nageloberflache kommt. Man kann also annehmen, daß es sich bei den Korrosionsschaden im Bereich des Corticalisfensters um eine typische Kontaktkorrosion handelt. Unterstützt wird diese Annahme noch durch die Beobachtung, daß Korrosion nicht an den überstehenden Nagelenden zu sehen ist (Abb. 2 und 10).

Breitet sich dagegen die Korrosion bis zur Schnittstelle hin aus, so weist dies darauf hin, daß sich das Nagelende selbst im Corticalisloch befand.

Abb. 10. Oberflächliche Kontaktkorrosion im Bereich des Fensters. Die überstehenden Nagelenden sind nicht korrodiert.

Während die über das Fenster hinausragenden Nagelenden nicht von Korrosion betroffen werden, werden im Bereich der Nägelkurve, also zwischen Fenster und Auftreffeld ebenso häufig Korrosionserscheinungen beobachtet, wie an den Stellen der Bündelschnürung. Ursache der Korrosion in diesem Abschnitt, also im paraspongiösen, konvergierenden Trichter, ist besonders der Faktor, daß schon beim Einschlagen einige Nägel in eine vom Idealzustand abweichende, asymmetrische Lage gezwängt werden und sich infolgedessen an bestimmten Stellen mit anderen Nägeln überkreuzen. An diesen Berührungsstellen können die sich kreuzenden Nägel wiederum so stark in Kontakt stehen, daß es zu lokalen Veränderungen der Oberfläche und als Folge davon zu Bildung eines galvanischen Elementes kommt.

Dieses Überkreuzen der Nägel stellt eine häufige Korrosionsursache dar, wie der oft beobachtete schräge Verlauf der Korrosionsstellen beweist.

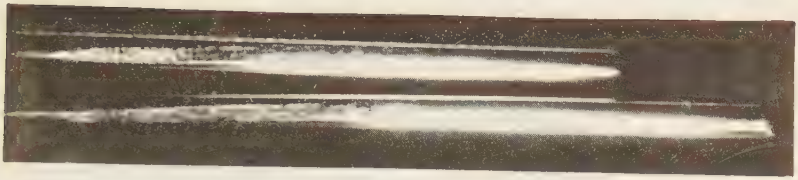

Abb. 11. Zwei Oberarmnägel (142 Tage nach der Nagelung) mit schräg verlaufenden, streifenförmigen Korrosionsstellen im Bereich der Nagelkurve (ca. 2/10 mm tief). Da beide Nägel völlig gleichartige Korrosionserscheinungen zeigen, darf man daraus schließen, daß sie in diesem Abschnitt nebeneinander lagen. Rekonstruiert man die Lage der Nägel in situ, indem man die Nägel mit den Korrosionsstellen aneinanderlegt, so wird klar, daß sich die Nägel hier überkreuzt haben.

Dieses Beispiel soll aber nicht zu der Meinung verleiten, daß Korrosion immer an Kreuzungsstellen zweier Nägel, die sich nicht nur im Bereich der Nagelkurve, sondern in jeder beliebigen Höhe befinden können, auftreten muß. Korrosion tritt nur dann auf, wenn gleichzeitig eine enorme Intensität der Verklemmung besteht, was allerdings meistens der Fall ist!

Die im Bereich des Cortikalisfensters und paraspongiösen Trichters gelegenen Nagelabschnitte sind gleichzeitig diejenigen Abschnitte, an denen das Einführungsinstrument angesetzt wird. Die hier beobachteten Korrosionsschäden beruhen also nicht auf einer Schädigung der Oberfläche durch das Einführungsinstrument, sondern auf ungünstigen mechanischen Verhältnissen.

Die zweite Schnürung des Bündels findet im Bereich der Taille statt. Die sanduhrförmige Gestalt der Markhöhle bringt es mit sich, daß hier die Nägel die stärkste Verklemmung erfahren. Je intensiver und je größer der Kontakt

zwischen einzelnen Nägeln ist, desto wahrscheinlicher kommt es zum Auftreten der Korrosion.

Dasselbe gilt für die endgültige Bündelschnürung durch die Verkeilungsnägel, mit denen in wechselnder Anzahl der konvergierende Trichter aufgefüllt wird und durch die die stärkste Verklemmung erzielt wird. Die größte Verklemmung wird durch die Nagelspitze erzielt. Die örtliche Übereinstimmung zwischen dem Maximum der Verklemmung und der Lokalisation der Korrosionsstelle demonstrieren Abb. 12 und Abb. 13.

Abb. 12. Kontaktkorrosion, hervorgerufen durch extrem starke Verkeilung. Die Verkeilung war so stark, daß es bei der Nagelung weder gelang, den Nagel weiter vorzuschlagen, noch ihn zurückzuziehen. Nagelentfernung nach 10 Monaten.

a) 20 cm langer Verkeilungsnagel, dessen Spitze an einer Seite starke Korrosionserscheinung aufweist, die zum Nagelende hin immer oberflächlicher wird.

b) 31 cm langer Nagel, der 18-20 cm vom Nagelende entfernt, die gleiche Korrosionserscheinung aufweist, wie der Verkeilungsnagel.

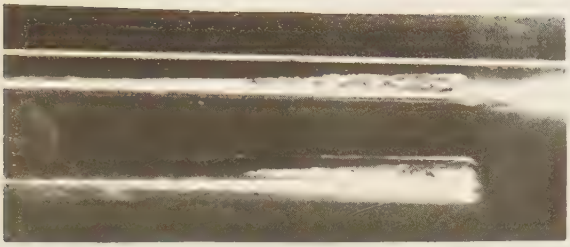

Abb. 13. Noch einmal die gleichen Erscheinungen wie in Abb. 12, nur etwas schwächer. Nagelentfernung nach 15 1/2 Monaten. Beidemale handelte es sich um Unterschenkelnagelungen.

Wesentlich seltener wurde Korrosion im vorletzten und letzten Sechstel beobachtet, also dort, wo der Verankerungstotraum am größten ist, da der divergierende Trichter im Gegensatz zum konvergierenden nicht mit Nägeln voll aufgefüllt werden kann.

Die Ursache der Korrosion in den unteren Nagelabschnitten liegt darin, daß einzelne vorgeschränkte Nägel nicht richtig verteilt werden, sei es, daß bereits liegende Nägel durch später eingeschlagene mit Gewalt in eine falsche Lage abgedrängt werden, oder sei es, daß die Nägel erst gedreht werden, nachdem die Spitzen schon in der Spongiosa verankert sind.

Dort, wo sich die Nägel überschneiden, kommt es bevorzugt zur Korrosion. Dafür spricht wiederum der schräge Verlauf der Korrosionsstellen, die hier beobachtet wurden.

So vorteilhaft wie diese Schlängelung und Drehung eines Nagels im Hinblick auf die Stabilisierungskraft des Nagelbündels sein mag, so nachteilig wirkt sie sich im Hinblick auf die Widerstandsfähigkeit des Nagels gegen korrosive Einflüsse aus.

Die im vorgeschränkten Nagelabschnitt auftetende Korrosion ist also nicht auf Oberflächenschädigung durch den

Schränkelevator oder auf die durch das Vorschränken entstandene Biegungsspannung zurückzuführen, sondern lediglich darauf, daß einzelne Nägel falsch liegen und den mechanischen Schädigungen, denen sie ausgesetzt sind, auf die Dauer nicht gewachsen sind (Abb. 14 und 15).

Abb. 14. Oberflächliche Kontaktkorrosion im vorgeschränkten Nagelabschnitt. Aus der Anordnung der Korrosionsstellen geht hervor, daß sich die Nägel noch im fensterfernen Spongiosastück überkreuzt haben. Die Korrosion ist hier also nicht eine Folge des Vorschränkens, sondern eine Folge übermäßiger, an den Kreuzungsstellen entstehender Kontakte.

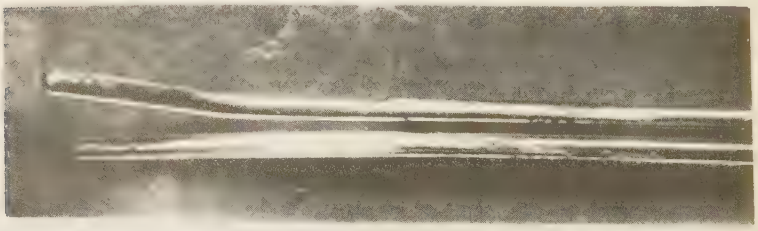

Abb. 15. Kontaktkorrosion oberflächlicher Natur, etwa 5 cm

von der Nagelspitze entfernt. Der schräge Verlauf der Korrosionsstellen macht deutlich, daß sich beide Nägel im parasspongiösen Teil des divergierenden Trichters überkreuzt haben müssen.

In den bisherigen Schilderungen spielte nur der intensive Druck als Faktor der Kontaktkorrosion eine Rolle, da der Zusammenhang zwischen Verklemmung und Auftreten der Korrosion allzu offensichtlich war. Nicht so offensichtlich ist der Zusammenhang zwischen Korrosion und minimalen Reibungen einzelner Nägel, da in der Regel ja bei der Nagelung eine Vollstabilität erreicht wird, wodurch Reibungen so gut wie unmöglich sind.

Aber trotzdem sollte man solche Reibungen als Faktor der Kontaktkorrosion nicht außer acht lassen, zumal es erfahrungsgemäß der Fall ist, daß sich trotz primär erreichter absoluter Stabilität die Nägel mit wachsendem Abstand vom Nagelungstage zunehmend lockern.

Die nachteilige Wirkung geringer Reibungen kann aber besonders dann zur Geltung kommen, wenn zB. bei der Nagelung keine Vollstabilität erzielt wird. Diese Annahme findet eine Stütze durch folgende Beobachtung, die bei einem 24-jährigen Patienten gemacht wurde. Bei diesem Patienten wurde bei der Nagelung des linken Unterschenkels nur eine elastische Stabilität der Fraktur erzielt. Die Nägel, die nach 5 Monaten entfernt wurden, wiesen erhebliche Korrosionsschäden auf (siehe Abb. 6).

dd) Wechselbeanspruchungen durch die Körperbewegungen

Zur ungünstigen mechanischen Konstellation einzelner Nägel kommt noch als weiter Faktor die mechanische Wechselbeanspruchung durch die Körperbewegungen. Über den Einfluß der Körperbewegungen schreibt R.NICOLE :" Entsprechend den Verhältnissen im menschlichen Organismus sind es meist nicht statische, sondern dynamische Kräfte. Wie aus der Werkstoffphysik bekannt ist, bedarf es bei dynamischen Einflüssen

ungleich schwächerer Einzelbeanspruchungen als bei statischen. Es ist deshalb kein Zweifel, daß die im Bewegungsapparat (speziell Gehakt) wirksamen Kräfte —— die immerhin rhythmische Stöße von mehreren hundert kg/qcm darstellen —— genügend stark sind, um Festigkeitsgrenzen auch des härtesten und edelsten Stahls zu überschreiten."

Durch diese Wechselbeanspruchung wird also der Korrosionsvorgang noch intensiviert. Diese Feststellung soll durch eine Beobachtung bekräftigt werden, die den großen Einfluß derartiger mechanischer Beanspruchung deutlich macht. Ein 17-jähriger Hilfsarbeiter erlitt 3 Monate nach einer Unterschenkelnagelung einen Unfall mit dem Moped und stürzte dabei auf den genagelten Unterschenkel. Da sich röntgenologisch kein Anhalt für eine Refraktur zeigte, lief der Patient herum, obwohl ihm eine längere Schonhaltung des Beines empfohlen wurde. Bei der Nagelentfernung 2 1/2 Monate später wiesen einige Nägel, trotz der relativ kurzen Verweildauer von 5 1/2 Monaten ziemlich starke Korrosionserscheinungen auf. Es ist also naheliegend hier die Korrosionsstärke mit der starken mechanischen Dauerbeanspruchung in Verbindung zu bringen.

Den Einfluß der Bewegung bestätigte L.BÖHLER, als er Fälle beschrieb, wo der Nagel ins Gelenk perforiert war. Er beobachtete Korrosion dort, wo der Nagel intraartikulär lag. Hier war das Metall kombinierter mechanischer und chemischer Beeinflussung ausgesetzt, der chemischen des Gelenkschaftes und der mechanischen der Bewegung.

Einen überzeugenden Beweis für den ungünstigen Einfluß der Bewegung lieferte R.NICOLE, der Metallstaub ins Kniegelenk einbrachte. Er fand, daß Metallose nur dann auftrat, wenn das Kniegelenk bewegt wurde.

R.NICOLE prüfte die Korrosionsbeständigkeit der einzelnen Metalle. Er kam zu folgendem Ergebnis :" Jeder Werkstoff, auch hochwertiger Stahl, kann durch Spannungsbeanspruchungen,

insbesondere durch wechselnde Dauerbeanspruchung, seine Korrosionsfestigkeit einbüßen.

Auch FERGUSON ist der Ansicht, daß keines der heute für Implantate verwendeten Metalle auf die Dauer diesen "stresses" gewachsen ist. Nach kurz oder lang führt diese dauernde mechanische Beanspruchung unweigerlich zum Verlust der Korrosionsfestigkeit. Es kommt zur "corrosion fatigue", zur "Korrosionsermüdung".

Die Korrosionsstärke der Nägel hängt also im Wesentlichen von mechanischen Kräften (Druck, Reibung, Wechselbeanspruchung) und chemischen Einwirkungen des Gewebssaftes ab. Aus dem Zusammenwirken all dieser Faktoren resultiert die Korrosionsstärke. Diese ist natürlich umso stärker, je länger und stärker ihre Wirkungen zur Geltung kommen. Man kann daher sagen, daß die Korrosionsstärke das Produkt aus einem mechanischen Faktor, einem chemischen Faktor und dem Zeitfaktor ist. Der mechanische Faktor stellt die am meisten variable Größe dar. Er kann bei dem einen Patienten größer, bei dem anderen kleiner sein. Die Schwankungen können dadurch entstehen, daß nicht bei jedem Patienten die gleiche Intensität des Kontaktes vorliegt, nicht immer Reibungen ausgeschlossen werden können und daß nicht jeder Patient die genagelte Extremität in gleichem Maße belastet. So kann es also passieren, daß bei manchen Patienten bei gleichem Zeitfaktor der mechanische Faktor variiert und folglich daraus verschieden starke Korrosionsschäden resultieren. Nur auf diese Art und Weise ist die Beobachtung zu erklären, daß manchmal Nägel mit einer kürzeren Verweildauer stärker korrodiert sind, als solche mit einer längeren Verweildauer. Korrosionsstärke und Verweildauer können, aber müssen nicht direkt proportional zueinander sein.

Daß dem mechanischen Faktor die entscheidende Bedeutung zukommt, bestätigt FERGUSON, wenn er schreibt:" Fatigue is not a function of time but of the number of repetitions of stress placed on the metal."

ee) Wechselwirkung

Schließlich ist auch eine Wechselwirkung zwischen Korrosion und Metallose denkbar, indem die Korrosion zur Metallose führt und diese ihrerseits wieder die Korrosion verstärkt, also einen circulus vitiosus darstellt.

3. Zusammenfassung der Korrosionsursachen

Die Analyse der in Frage kommenden Korrosionsursachen ergab, daß

a) Korrosion auf Grund eines Materialfehlers nur eine ganz untergeordnete Rolle spielt.

b) die Frage, welchen Einfluß leichte magnetische Eigenschaften auf die Korrosionsbeständigkeit haben, offen bleiben muß.

c) Beschädigung der Nageloberfläche durch Instrumente, als alleiniger Faktor, nicht zur Korrosion führte.

d) Korrosion als Folge zurückgebliebener Metallteilchen nicht beobachtet wurde.

e) die Bedeutung der unterschiedlichen Sauerstoffversorgung im Hinblick auf Korrosionsentstehung nicht beurteilt werden kann.

f) an den nur auf Biegung beanspruchten Nagelabschnitten Spannungskorrosion nicht nachgewiesen werden konnte.

g) die entscheidende Rolle der intensive Kontakt zwisch einzelnen Nägeln und die mechanische Wechselbeanspruchung durch die Körperbewegung spielen.

h) ein circulus vitiosus möglich ist.

Wahrscheinlich wird sich die Korrosion der Bündelnägel niemals ganz unterdrücken lassen, sondern muß in Kauf genommen werden. Wenn die Korrosionsschäden auch eine relativ häufige Komplikation darstellt, so liegen die Vorteile dieser Nagelungsmethode so offen zu Tage, daß die Korrosionszwischenfälle, deren Stärke sich stets im Rahmen des Tragbaren hielt, auf keinen Fall eine Kontraindikation zur Frakturenbehandlung sind.

F. Allgemeine Vorbeugungsrichtlinien

Auch wenn sich die Korrosionsschäden nicht ganz ausschalten lassen werden, so muß es wenigstens das Ziel sein, diese Schäden auf ein Minimum herabzudrücken. Dies ist nur möglich durch Beachtung folgender Punkte:

1. Die Nägel kein zweites Mal verwenden, auch wenn sie noch so gut aussehen mögen.

2. Nagelentfernung zum möglichst frühen Zeitpunkt.

3. Sorgfältige Behandlung der Nägel vor der Operation, um unnötige Schäden zu vermeiden.

4. Verwendung nur garantiert einwandfreier Stähle.

5. Herabsetzung des mechanischen Faktors durch möglichst schonende Belastung der genagelten Extremität.

G. Suche nach besseren Stählen

Welche Forderungen müssen an die Metalle gestellt werden, wenn sie längere Zeit im menschlichen Organismus verweilen sollen? In Frage kommt nur Material, das wenigstens in Ruhe korrosionsfest ist. Die Auswahl unter diesen richtet sich dann nach den physikalischen Eigenschaften.

Von metallurgischer Seite fordert man Korrosionsbeständigkeit, ausreichende Härte, gute Elastizität und hohe Festigkeit.

Von klinischer Seite sind zu verlangen: einwandfreie Gewebsverträglichkeit und ein tragbarer Preis.

Der moderne Edelstahl V_2A, aus dem die Bündelnägel bestehen, hat folgende durchschnittliche Zusammensetzung(%):

C	Cr	Ni	Fe
0,12	18	9	73

Dieser V_2A-Stahl wird heute auf Grund seiner hohen mechanischen Festigkeit und fast völligen Gewebspassivität am meisten für Metallosteosynthesen verwendet. Da aber auch bei diesem "chirurgisch einwandfreien" Stahl, der als "korrosionsfest" und "rostfrei" gepriesen wird, — M. Lange bezeichnet ihn als "optimal"— Korrosion nicht zu vermeiden ist, war man bestrebt, nach neuen Stählen, die den Anforderungen einer idealen Allenthese in einem höheren Maße gerecht werden, zu suchen.

In Frage kommen hier noch der V_4A-Stahl und das Vitallium. Das Vitallium, eine Legierung aus Co-Cr-Mo, wird von allen Autoren als das ideale Allenthesenmaterial empfohlen, da niemals Korrosionserscheinungen beobachtet wurden. Vitallium hat durch seine Korrosionsbeständigkeit große Vorteile gegenüber den bisher verwendeten Stählen. Aber wie steht es mit den anderen Eigenschaften? Was die Festigkeit anbetrifft, so ist man enttäuscht. Er erfüllt die mechanischen Anforderungen eines stabilen, elastischen Bündelnagels nicht annähernd und scheidet deshalb aus. Auch der hohe Preis eines Nagels von 18 DM würde eine routinemäßige Anwendung nicht rechtfertigen.

Da Vitallium zwei wesentliche Forderungen nicht erfüllt, ist jede Diskussion über seine Verwendung als Nagelmaterial überflüssig.

Wie steht es mit dem V_4A-Stahl mit der durchschnittlichen chemischen Zusammensetzung (%):

C	Cr	Ni	Mo	Fe
0,07	18	10	2,2	70

Der austenitische Chrom-Nickel-Stahl V_4A enthält noch einen geringen Zusatz von Molybdän, wodurch die Korrosionsbeständigkeit gegenüber dem V_2A-Stahl etwas erhöht werden soll.

M.LANGE ist der Meinung, daß es am besten wäre, für Osteosynthesen den V_4A-Stahl zu verwenden.

Aber auch der V_4A-Stahl ist bei gleichzeitiger Dauerbeanspruchung gegen den Angriff korrosiver Mittel keineswegs geschützt, wenn auch etwas stärker, wie Untersuchungen von SCALES und WINTER ergaben. Sie fanden, daß bei Schrauben und Platten aus dem 18/8 Stahl (entspricht dem V_2A-Stahl) insgesamt 51% Korrosionserscheinungen aufwiesen, während es bei Platten und Schrauben aus dem 18/8 Mo-Stahl (entspricht dem V_4A-Stahl) nur 24% waren, die korrodiert waren.

Es steht fest, daß auch der V_4A-Stahl der Korrosion unterworfen ist und die mechanischen Eigenschaften des V_2A-Stahls nicht übertrifft.

Der V_2A-Stahl hat sich, wenn man von den unvermeidbaren Korrosionsschäden absieht, bei den Bündel-Nagelungen in jeder Hinsicht bewährt. Es steht außer Zweifel, daß der V_2A-Stahl mit seinen guten mechanischen Eigenschaften, seiner Gewebsverträglichkeit und seinem tragbaren Preis heute das Material ist, das für Metallosteosynthesen die häufigste Verwendung findet. Er hat seinen Platz behauptet, obwohl viele Versuche unternommen wurden, bessere, insbesondere korrosionsfeste Stähle zu finden. Viele Chirurgen empfehlen zwar die Anwendung von V_4A-Stähl und Vitallium, verwenden aber nach wie vor den bewährten V_{2A}-Stahl.

II. Metallose

Neben dem metallurgischen Problem der Korrosion interessiert als zweite Komplikation bei Verwendung von Metallosteosynthesen die Metallose.

A. Begriffsbestimmung

Eine treffende Definition des Begriffs Metallose gab BÜRKLE DE LA CAMP, der vorgeschlagen hat, "jede durch einen metallischen Fremdkörper entstandene Schädigung des Knochens, der Gelenke und des benachbarten Gewebes, die sich durch Kalkmangel, Knochenschwund, reaktive Wucherung, Höhlenbildung und ähnliche Vorgänge erkennbar macht, als Metallose" zu bezeichnen.

B. Metalloseschäden nach Bündel-Nagelungen

Nach K.H.HACKETHAL kann man nach Bündel-Nagelungen folgende Reaktionsformen beobachten, die als Ausdruck einer Metallose zu werten sind.

1. Periostitis-Symptome
2. Spongiosa-Porosen
3. Spontanschmerzen des genagelten Knochens
4. Metallimprägnation des Nagellagers

Auf die ersten drei Metalloseerscheinungen soll nicht näher eingegangen werden. Im Mittelpunkt der Metalloseschäden steht hier die Metallimprägnation des Nagellagers, d.h. die chemische Schädigung des Gewebes.

C. Metallimprägnation des Nagellagers

1. Untersuchung des Gewebes

a) Histologisch

Die im Rahmen der Nagelentfernung entnommenen Gewebs-

stücke wurden in Formalin (4%) fixiert und dann in üblicher Weise in Paraffin eingebettet. Von jedem Paraffinblock wurden zwei Schnitte angefertigt, von denen einer zum Nachweis von Eisenionen mit Turnbull`s Blau gefärbt wurde, während der andere Schnitt zur Sichtbarmachung der Gewebsreaktion mit Haematoxylin-Eosin gefärbt wurde. Im ganzen wurden 36 Gewebsstücke untersucht.

aa) Untersuchung des Gewebes auf entzündl. Reaktion

Die Betrachtung der nach H-E gefärbten Präparate ergab, daß das um die Nagelenden liegende Gewebe stets typisches, vaskularisiertes Narbengewebe darstellte. In keinem Fall war eine Entzündung als Folge der Metallose nachzuweisen.

bb) Untersuchung des Gewebes auf Eisenionen

Die Metallimprägnation,die in der Hauptsache eine Eisenimprägnation ist, war nach Bündel-Nagelungen im Einschlagbereich, bei reizlosen Wundverhältnissen, in einigen Fällen bereits makroskopisch als bräunlich-schwarze Verfärbung sichtbar.

Kommt es nun nach Bündel-Nagelungen jedesmal zu einer Imprägnation des umliegenden Gewebes mit Eisenverbindungen, auch wenn makroskopisch keine Veränderungen sichtbar sind?

Um diese Frage beantworten zu können, wurden Gewebsstücke aus der unmittelbaren Umgebung der Nagelenden mit Turnbull`s Blau gefärbt.

Die mit Turnbull`s Blau gefärbten Präparate zeigten nun überraschenderweise in den meisten Fällen einen positiven Eisennachweis. Die Eisenimprägnation war entweder geringgradiger, stärkerer oder gar massiver Natur.(Tab. 2)

E i s e n a b l a g e r u n g			
keine	geringe	stärkere	massive
5	17	8	6
13,9%	47,2%	22,2%	16,7%

Tab.2. Ergebnis der Untersuchung von 36 Gewebsstücken

In den meisten Fällen ist die Eisenimprägnation nur geringgradiger oder stärkerer Natur (Abb. 16-19). Dabei ist das Eisen entweder diffus im ganzen Gewebe verteilt oder nur an ein paar Stellen abgelagert.

Betrachtet man die histologischen Schnitte bei stärkerer Vergrößerung, so sieht man, daß das Eisen sowohl intrazellulär, als auch extrazellulär liegt.

Bei der massiven Eisenimprägnation bilden sich häufig regelrechte, mächtige Eisenlager. Diese Annäufungen mit Eisenverbindungen sind teils so stark, daß sie im mikroskopischen Bild nur mehr als dunkle Flecken erscheinen (Abb. 20 und 21).

Über die verschiedenen Grade der Eisenimprägnation sollen einige Mikrofotos einen Eindruck verleihen.

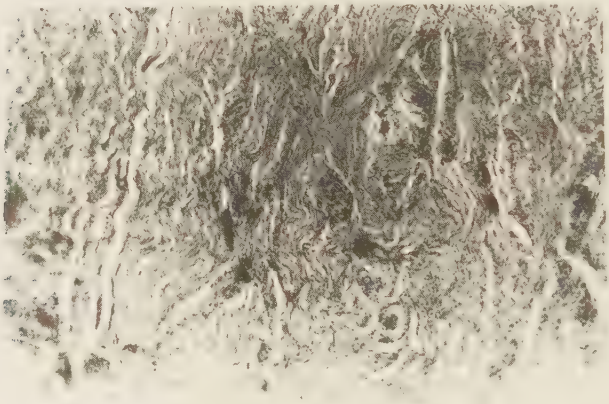

Abb. 16. Granulationsgewebe mit geringgradigen Eisenablagerungen an ein paar Stellen (schwarze Flecken). Färbung mit Turnbull's Blau. Zur Sichtbarmachung der anderen Gewebsstrukturen wurden die Präparate noch mit Kernechtrot gegengefärbt.

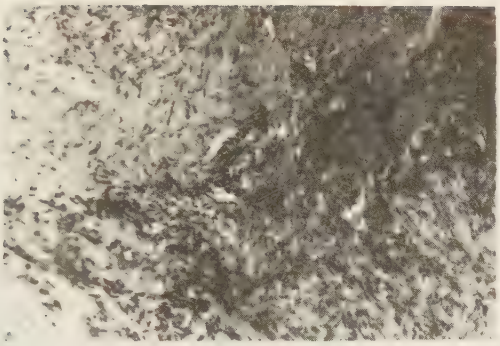

Abb. 17. Ebenfalls geringgradige Imprägnation des um die Nagelenden liegenden Granulationsgewebes mit Eisenverbindungen, die hier mehr diffus verteilt sind.

Abb. 18. Stärkere Eisenimprägnation des Gewebes an einer Stelle. Im übrigen zeigt das Gewebe ziemlich gleichmäßig verteilte Eisenablagerungen geringgradiger Natur.

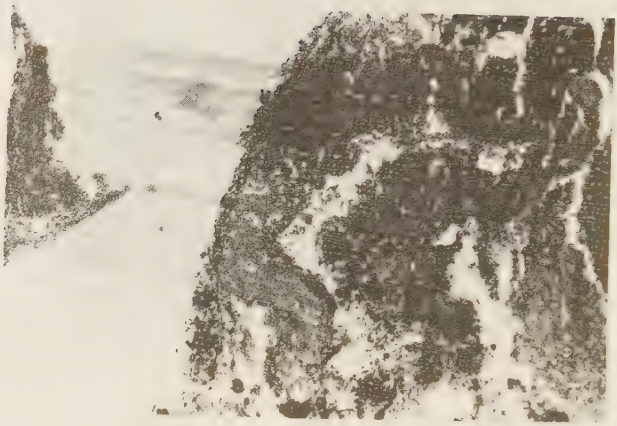

Abb. 19. Stärkere Eisenablagerungen, sichtbar als schwarze Flecken.

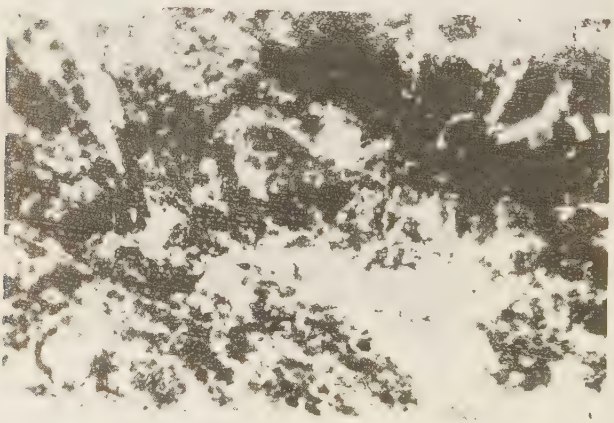

Abb. 20. Massive Eisenablagerung. Die Eisenimprägnation ist so stark, daß die normalen Gewebsstrukturen, im Gegensatz zu den bisher gezeigten Bildern, fast verschwinden.

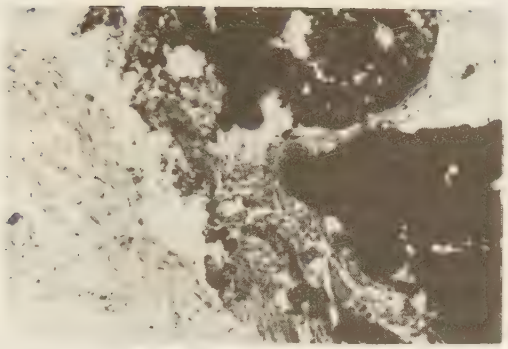

Abb. 21. Nocheinmal massive Eisenimprägnation, die sich hier vorwiegend auf eine Stelle beschränkt.

b) Spektralanalytisch

Die histologischen Präparate informieren über die morphologische Abwanderung von Nagelmaterial ins Gewebe. Eine spektralanalytische Untersuchung einiger Gewebsstücke soll die Frage beantworten, ob nur die Eisenkomponente des Stahls abwandert (zB. als Rost) oder ob auch neben Eisen die übrigen Bestandteile des Stahls, Chrom und Nickel, ins Gewebe abwandern und dort nachzuweisen sind.

Aus diesem Grunde wurden einige Gewebsstücke spektralanalytisch untersucht (Chem.Untersuchungsamt Stuttgart). Das Ergebnis dieser Gewebsanalysen war, daß, wie erwartet, neben Eisen auch Chrom und Nickel im Gewebe vorhanden waren. In den Gewebsstücken, in denen bereits mit Hilfe der Eisenfärbung massive Eisenimprägnation festzustellen war, waren eindeutig die größten Metallkonzentrationen anzutreffen.
Die Spektralanalyse ergab außerdem, daß in einem Gewebsstück

Kobalt und in allen Gewebsstücken Kupfer vorhanden war. Auch im normalen Narbengewebe, das zum Vergleich herangezogen wurde, war neben Eisen noch Kupfer nachzuweisen. Das Vorkommen von Kupfer und Kobalt ist unerklärlich.

2 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Die histologische Untersuchung von 96 aus der unmittelbaren Umgebung der Nagelenden entnommenen Gewebsstücken ergab, daß das Gewebe stets normales Narbengewebe darstellte und daß in keinem Fall eine Entzündung als Folge der Metallose nachzuweisen war.

Der histochemische Eisennachweis war nur in ca. 14% der Fälle negativ. In den restlichen Fällen war eine Eisenimprägnation nachzuweisen, die entweder geringgradiger, stärkerer oder massiver Natur war. Die Eisenverbindungen lagen sowohl intrazellulär als auch extrazellulär.

Die Untersuchung mittels der Spektralanalyse zeigte, daß die Bestandteile des V_2A-Stahls in das umliegende Gewebe abwandern. Es handelt sich also um einen Zerfall des ganzen Materialgefüges und nicht nur um das Herauslösen der Eisenkomponente.

3. Metallimprägnation bei anderen Nagelungen

Metallimprägnation wurde nicht nur nach Bündel-Nagelungen beobachtet, sondern auch nach allen anderen Nagelungen, die mit dem V_2A-Stahl durchgeführt wurden.

COHEN berichtete von metallimprägniertem Gewebe, das aus unmittelbarer Nachbarschaft eines stark korrodierten Steinmann-Nagels entfernt wurde. Er fand in einem Gewebschnitt, der mit Berliner Blau gefärbt war, "deposits of iron salts".

Ebenso fanden SCALES und Mitarbeiter, daß Gewebe aus der Umgebung korrodierte Implantate positive Eisenfärbung zeigte.

H.SEYFARTH konnte winzige Spuren löslicher Metall-

ionen im Gewebe mit einem histotopochem. Verfahren nachweisen. So beobachtete er zB. Ablagerungen von Eisenionen in Gewebsstücken, die anläßlich der Nagelentfernung nach Schenkelhalsnagelung oder Küntschernagelung entnommen wurden.

Ursprünglich war auch geplant, das bei der Bündelnägelentfernung entnommene Gewebe mit diesem histotopochemischen Nachweis auf Eisenionen zu untersuchen. Die Durchführung scheiterte aber an technischen Schwierigkeiten.

4. Ursachen der Metallimprägnation

Die nach Bündel-Nagelungen beobachteten Metallimprägnationen der Nagellager können nun entweder durch Korrosionsprodukte oder durch zurückgebliebene Metallteilchen bedingt sein.

a) Korrosionsprodukte

Beim Korrosionsvorgang entstehen entsprechend den chem. Bestandteilen des Stahls Abbauprodukte, die dann im umliegenden Gewebe abgelagert werden.

Als Beispiel einer chem. Zersetzung eines Metalls und Abgabe von Abbauprodukten an das Gewebe führt R.NICOLE die Rostbildung eisenhaltiger Verbindungen an. Diese Rostbildung "beruht streng genommen nicht auf einem chem., sondern elektrochem. Prozess, bei dem sich zunächst $Fe(OH)_2$ und in zweiter Etappe durch Oxydation $Fe(OH)_3$ bildet. Das $Fe(OH)_3$ imprägniert das Protoplasma umliegender Zellen."

H.SEYFARTH berichtet zur Frage der Metallimprägnation: "Resorptionserscheinungen sind nur möglich, wenn das Metall in eine lösliche Form übergeht, wobei also Metallionen frei werden. Diese löslichen Metallionen wandern dann vom Metall in das Körpergewebe ab."

Nach COHEN und FOUTZ wandern nur wenige der bei der Korrosion gebildeten Ionen von ihrem Entstehungsort weg, während die meisten Ionen mit den bereits in der nächsten Umgebung vorhandenen Ionen relativ unlösliche Verbindungen eingehen und sich nahe den Korrosionsstellen ablagern.

Daß sich die Korrosionsprodukte in der Umgebung der Korrosionsstellen ablagern und zur Metallimprägnation führen, dafür sprechen auch unsere histologischen Untersuchungen. Ein Vergleich der im histologischen Bild gefundenen Eisenmengenmit den Nägeln, aus deren Umgebung die Gewebsstücke stammen, macht deutlich, daß hier eine Beziehung besteht.

Um einen positiven Eisennachweis zu geben, genügten winzige Korrosionsstellen in der Nähe der Nagelenden. Massiver Eisennachweis war zB. nur in der Umgebung stark korrodierter Nagelenden zu sehen. In 5 Fällen, in denen der Eisennachweis negativ war, waren die Nägel entweder ganz unversehrt oder die Korrosionsstellen waren weiter vom Nagelende entfernt, zB. in Nagelmitte. Eine eindeutige Parallelität zwischen dem Schweregrad der Korrosion und der Menge der Eisenablagerungen konnte allerdings in allen untersuchten Präparaten nicht festgestellt werden. Die Ursache dieser fehlenden Übereinstimmung mag darin zu suchen sein, daß die Gewebsstücke nicht immer in der Umgebung der Korrosionsstellen entnommen wurden.

Aber allgemein darf man sagen, daß die Eisenmenge proportional der Stärke der Korrosion ist, vorausgesetzt, daß die Gewebsentnahme auch exakt am Orte der Korrosion erfolgt.

b) Zurückbleiben von Metallteilchen

Die hier untersuchten Gewebsstücke wurden bei der Nagelentfernung aus der Umgebung der Nagelenden entnommen. An diesen Nagelenden könnten nun Metallteilchen, die möglicherweise beim Abschneiden der Nägel entstehen, zurückbleiben und den positiven Eisennachweis bedingen. Eine Unterstützung findet diese Annahme durch eine Untersuchung P.LAING'S, der nach 3 Monaten in unmittelbarer Umgebung von Vitalliumschrauben minimale Eisenspuren nachweisen konnte. Da nun Vitallium nur weniger als 1% Eisen enthält, (nach R.NICOLE keines) so folgert LAING, daß dieses Eisen noch von den Werkzeugen stammen muß, mit denen das Vitallium in Berührung gekommen ist.

Obwohl bei der Bündel-Nagelung die Wunden nach dem Abschneiden der Nägel noch mit einem feuchten Tupfer ausgewischt werden, ist es fraglich, ob immer alle Metallteilchen erfaßt werden können. Bleiben Teilchen zurück, so kann es der Fall sein, daß die Metallimprägnation durch solche zurückgebliebene Metallspuren mitbedingt sein kann. Mit größter Wahrscheinlichkeit ist aber die Metallimprägnation Folge der Korrosion und nicht Folge zurückgebliebener Metallpartikeln. Gegen die Metallimprägnation durch zurückgebliebene Teilchen spricht einerseits die Beobachtung, daß Korrosion und positiver Eisennachweis auffallend regelmäßig zusammenfallen, andererseits das Fehlen färberisch darstellbarer Eisenablagerungen bei nicht korrodierten Nägeln. Außerdem müßte eine Beziehung zwischen Metallimprägnation und Zahl der abgeschnittenen Nägel bestehen, das heißt, die Imprägnation müßte um so stärker sein, je mehr Nägel verwendet wurden. Das ist nicht der Fall.

Zusammenfassend darf man die berechtigte Schlußfolgerung treffen, daß die Metallimprägnation des Nagellagers ihre wichtigste Ursache in der Korrosion der Bündelnägel hat.

5. Klinische Auswirkungen der Metallimprägnation

BÖHLER berichtet von schwer angegriffenen Nägeln, wobei das um die Nägel liegende Granulationsgewebe schwärzlich schmutzig verfärbt und metallimprägniert war. Klinisch hatte die Metallose Schmerzen und Bewegungsstörungen zur Folge, die aber nach Entfernung der Nägel wieder verschwanden.

Auch bei Bündel-Nagelungen wurden öfters Schmerzen im Bereich des genagelten Knochens beobachtet. Sie werden in der Regel als relativ gering bezeichnet. Doch in einem Fall waren bei einer Unterschenkelfraktur im mittleren Drittel die Schmerzen nach 15 1/2 Monaten so stark, daß sie Anlaß zur Nagelentfernung waren. Außerdem war der Unterschenkel stark angeschwollen. Bei der Nagelentfernung war die Entnahmestelle

völlig reizlos, auch histologisch war keine Entzündung nachzuweisen. Die Nägel waren im Bereich der Nagelenden sehr stark korrodiert. Die Eisenfärbung ergab massive Eisenablagerung.

Diese Schmerzen, über die der Patient klagte, sind auf jeden Fall der Metallose zuzuschreiben. Beruhen sie aber auf mechanischer Schädigung, sind sie also druckbedingt, oder hat die massive Metallimprägnation zu den Schmerzen geführt?

Gegen die Ursache der Schmerzen durch Metallimprägnation spricht die Beobachtung, daß die Schmerzen nicht am Orte der stärksten Imprägnation, sondern im Bereich der Bruchstelle lokalisiert waren. Nach der Nagelentfernung klagte der Patient noch manchmal über periodisch wiederkehrende, vor allem wetterabhängige Schmerzen.

Es ist daher anzunehmen, daß die Schmerzen hier, genau wie bei anderen Bündel-Nagelungen, druckbedingt sind und nicht auf chem. Schädigung durch Metallimprägnation zurückzuführen sind.

Als Folge der Metallose beobachtete M.LANGE aseptische, chemische Abszesse, die dadurch charakterisiert sind, daß es Spätabszesse sind und erst zwei oder auch mehrere Wochen nach der Operation, d.h. nach der eigentlichen Wundheilung, auftreten.

Nach Bündel-Nagelungen waren bisher derartige Abszesse, auch bei massiver Metallimprägnation, nicht aufgetreten.

Diese chem. Gewebsimprägnation kann zwar für die Vitalität der Zellen nicht ganz bedeutungslos sein. auch wenn bisher nach Bündel-Nagelungen, selbst bei massiver Imprägnation, keine klinisch erkennbaren patho-physiologischen Folgen zu beobachten waren. Vielleicht hat dies seine Ursache darin, daß die Metallose, wie R.NICOLE annimmt, bis zu einem gewissen Zeitpunkt überwunden werden kann.

FERGUSON ist der gleichen Ansicht, wenn er schreibt: "Apparently there is a concentration toleranc in the tissues up to a certain point the concentation can be removed."

Abschließend darf man also feststellen, daß die lokalen Metallimprägnationen der Nagellager bisher keine klinisch erkennbaren Auswirkungen zur Folge hatten.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Mir war zur Aufgabe gestellt, Untersuchungen über Korrosionserscheinungen und Metallose bei Bündel-Nagelungen durchzuführen.

I. Untersuchungsergebnisse über die Korrosionserscheinungen:

1. Wie stark ist die Korrosion der Bündelnägel?

Von den 329 Bündelnägeln, die nach einer durchschnittlichen Verweildauer im Markraum von 7 3/4 Mon. entfernt wurden, wiesen rund 83% Schäden irgendwelcher Art auf. Die Messungen mit der Schiebelehre ergaben, daß es sich in den meisten Fällen (ca. 67%) nur um geringe oberflächliche (nicht mehr meßbar oder 1/1o mm tiefe) Korrosion handelte. Lediglich in einem relativ geringen Prozentsatz (ca. 16%) waren stärkere Korrosionsschäden (2/1o mm und darüber) zu verzeichnen.

2. Welche Fläche nehmen die Korrosionsstellen ein?

Die Ausdehnung der Korrosionsstellen betrug im Durchschnitt etwa 1o bis 5o qmm. Sie erreichte in den leichtesten Fällen einige qmm, im Höchstfall dagegen ca. 1oo qmm.

3. Zeigen die Korrosionsstellen irgendwelche Charakteristika des Aussehens und der Lokalisation?

Die Korrosionsstellen treten nur an Kontaktstellen benachbarter Nägel auf. Sie zeigen fast stets einen länglichen, den Kontaktstellen entsprechenden Verlauf.
Korrosion wurde an allen Nagelabschnitten beobachtet, niemals dagegen an den Schnittstellen.

4. Was bedeuten die bräunlichen Auflagerungen in der Umgebung der Korrosionsstellen?

Die bräunlichen Auflagerungen in der Umgebung der Korrosionsstellen sind, wie durch die Berliner-Blau Reaktion und die Benzidinprobe festgestellt werden konnte, durch Rost- und Blutspuren bedingt.

5. Bestehen Zusammenhänge zwischen Verweildauer, Nagelungstyp und Korrosionsstärke?

Eine Gegenüberstellung von Korrosionsstärke und Verweildauer ergab, daß keine strenge Beziehung zwischen Korrosionsstärke und Verweildauer der einzelnen Nägel besteht. Eine Abhängigkeit der Korrosion vom Nagelungstyp besteht nicht.

6. Bestehen auffallende Unterschiede zwischen den Korrosionsschäden der Bündelnägel und anderer Marknägel?

Wesentliche Unterschiede im Hinblick auf Korrosionsschäden waren im Vergleich zu anderen Marknägeln nicht festzustellen.

7. Ursachen der Korrosion?

Auf Grund der Analyse der Korrosionserscheinungen konnte die Feststellung getroffen werden, daß die wichtigste Ursache der Korrosion an den Bündelnägeln auf die an den Berührungsstellen benachbarter Nägel zur Geltung kommenden Kräfte, Druck und Reibung, zurückzuführen ist. Diese Kräfte können bei genügender Intensität die Nageloberfläche primär durch mechanische Abreibung so verändern, daß es sekundär an diesen Stellen durch Bildung eines Volta-Elementes zum elektrochem. Vorgang der Korrosion kommen kann. Begünstigend wirkt sich auf die Metallzersetzung die gleichzeitige mechanische Beanspruchung der genagelten Extremität durch den Bewegungsvorgang aus, da die mechanische Wechselbeanspruchung zur "Korrosionsermüdung" selbst des hochwertigen Stahls führen kann.
Grundsätzlich kann die Kontaktkorrosion überall dort auftreten, wo einzelne Nägel intensiv in Kontakt stehen, oder wo zwischen einzelnen Nägeln minimale Reibungen möglich sind. Als Praedilektionsstellen der Kontaktkorrosion sind die Verklemmungspunkte an den Stellen der Bündelschnürung und die durch die asymmetrische Lage einzelner Nägel bedingten Kreuzungsstellen anzusehen.

8. Gibt es außer dem V2A-Stahl noch ein geeigneteres Allenthesenmaterial?

In Frage kommen der V4A-Stahl und das Vitallium. Das Vital-

lium ist zwar korrosionsbeständig, erfüllt aber die mechanischen Forderungen eines elastischen und stabilen Bündelnagels nicht annähernd und scheidet daher aus.
Was die Korrosionsbeständigkeit des V4A-Stahls anbetrifft, so ist er - nach Untersuchungen amerikanischer Autoren - bei gleichzeitiger Dauerbeanspruchung gegen den Angriff korrosiver Mittel etwas resistenter als der V2A-Stahl.
Die mechanischen Eigenschaften des V2A-Stahls werden nicht übertroffen.

II. Die Untersuchung der Metallimprägnation des Nagellagers, einer Erscheinungsform der Metallose, führte zu folgenden Ergebnissen:

1. Ist in der Umgebung des Nagellagers histochemisch Eisen nachzuweisen?

Untersucht wurden 36 Gewebsstücke, die der unmittelbaren Umgebung der Nagelenden entnommen wurden. Der Histochemische Eisennachweis mit Turnbull's Blau war nur in 5 Fällen (14%) negativ. In 17 Fällen (ca. 47%) war die Eisenimprägnation geringgradiger, in 8 Fällen (ca. 22%) war sie stärkerer und in 6 Fällen (ca. 17%) war sie massiver Natur.

Die Eisenverbindungen waren entweder diffus im ganzen Gewebe verteilt oder nur an ein paar Stellen abgelagert. Bei der massiven Eisenimprägnation bildeten sich häufig mächtige Eisenlager, die im mikroskopischen Bild jegliche Gewebsstruktur überdeckten. Die Betrachtung der Präparate bei stärkerer Vergrößerung ergab, daß die Eisenverbindungen sowohl intra- als auch extrazellulär lagen.

2. Zeigt das Gewebe in der Umgebung des Nagellagers entzündliche Reaktion?

Von den 36 nach H-E gefärbten Präparaten war in keinem Fall eine entzündliche Reaktion als Folge der Metallose nachzuweisen. Das um die Nagelenden liegende Gewebe stellte nur Narbengewebe dar.

3. Wandert bei der Korrosion der Nägel nur die Eisenkomponente ab, oder sind auch die anderen Bestandteile des V2A-Stahls im Gewebe nachzuweisen?

Die spektralanalytische Untersuchung einiger Gewebsstücke ergab, daß sich nicht nur die Eisenkomponente in der Umgebung ablagert, sondern daß sich auch die übrigen Bestandteile des Stahls, Chrom und Nickel, in der Umgebung ablagern.

4. Wie steht es mit Metallimprägnation bei anderen Nagelungen?

Metallimprägnation wurde nicht nur nach Bündel-Nagelungen beobachtet, sondern auch, wie aus der Literatur ersichtlich ist, auch nach anderen Nagelungen.

5. Ursachen der Metallimprägnation?

Als Ursache der Metallimprägnation ist weniger das Zurückbleiben von Metallteilchen beim Abschneiden der Nägel verantwortlich zu machen, als vielmehr die Korrosion der Nägel, was daraus ersichtlich wird, daß

a) Korrosion der Nagelenden und positiver Eisennachweis auffallend regelmäßig zusammen auftreten,

b) bei nichtkorrodierten Nägeln färberisch darstellbare Eisenablagerungen fehlen,

c) keine Beziehung zwischen Zahl der abgeschnittenen Nägel und Metallimprägnation besteht.

6. Hat man klinische Auswirkungen der Metallimprägnation beobachtet?

Klinisch erkennbare Auswirkungen der lokalen Metallimprägnation waren bisher, auch bei massiver Imprägnation, nicht zu beobachten.

L i t e r a t u r

BÖHLER, L.: zit. n. R.NICOLE

BÜRKLE DE LA CAMP, H. : zit. nach K.H.HACKETHAL

COHEN, J. and G.HAMMOND : Corrosion in a Device for Fracture Fixation. J.Bone Jt. Surg. 41 A 524 (1959).

— and S.FOUTZ : Failure by Corrosion of a Steinmann Pin used for Intramedullary Fixation. J.Bone Jt. Surg. 42 A 1201 (1960).

FERGUSON,A.B.: Metals in Living Tissues. Surg. Clin. N. Amer.40, 521 (1960).

— P.G.LAING and E.S.HODGE : The Jonization of Metal Jmplants in Living Tissues. J.Bone Jt. 42 A, 1 (1960).

HACKETHAL, K.H.: Die Bündel-Nagelung. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1961.

Krösl, W., zit. nach K.H.HACKETHAL.

LAING, P.G.: The Signifance of Metallic Transfer in the Corrosion of Orthopaedic Screws. J.Bone Jt. Surg. 40 A, 853 (1958)

— A.B.FERGUSON and E.S.HODGE: Spectrochemical Determination of Trace Metals in Normal Striated Muscle in the Rabbit. J.Bone Jt.Surg. 41 A, 737 (1959) (2).

— L.R.MADANCY, and M.A.GREBNER: A Radioisotopic Investigation of the Contamination of Screws and Tissues by Screwdrivers. J.Bone Jt.Surg. 41 A 535 (1959) (1).

LANGE, M.: Die Gefahren und Fehler der Osteosynthese. Verh. dtsch. Ges. Orthop. 46, 451 (1959).

NICOLE, R.: Metallschädigung bei Osteosynthesen. Benno Schwabe, Basel 1947.

SCALES, J.T., G.D.WINTER and H.T.SHIRLEY: Corrosion of orthopaedic Implants, Screws, Plates and Femoral Nail-plates. J.Bone Jt.Surg. 41 B,310 (1959).

—— Corrosion of Orthopaedic Implants, Smith Petersen Type Hip Nails. Brit. med. Journ. 478, Aug. 19, 1961.

SCHINK, W.: Welche Stähle sind für medizin. Zwecke geeignet? Chir. prax. 6, 1962, 59-62. E. u. H. Marseille Verlag München.

SEYFARTH,H.: Klinische Erfahrungen und histotopochem. Untersuchungen bei Metallimplantationen. Verh. dtsch. Orthop. 46, 517 (1958).

M e i n L e b e n s l a u f

Ich, Johann B l ü m l, wurde am 6. September 1935 als erstes Kind des Postschaffnerehepaares Johann und Berta Blüml, geb. Weilhart, in Seestetten kreis Passau geboren.

Die Volksschule besuchte ich von 1942-46 in Sandbach und von 1946-48 im Knabeninstitut Fürstenstein. 1948 trat ich in die Oberrealschule in Passau ein und legte dort 1957 das Abitur ab.

Im November 1957 immatrikulierte ich mich an der Universität München für das Medizinstudium. In München studierte ich 5 Semester. Nach dem 5. Semester, am 26. Februar 1960, machte ich das Physikum und ging dann an die Universität Erlangen, um hier mein klinisches Studium zu beginnen. Nach dem 6. klinischen Semester legte ich hier an der Universität Erlangen am 26. Juli 1963 die ärztliche Prüfung ab.

GEDRUCKT BEI LUDWIG MÜLLER ERLANGEN